

коэффициент диффузии D_{Σ} для системы основа — слой изменяется незначительно (всего в 2...3 раза). Стационарная плотность потока водорода через сталь 20 с покрытиями различной природы колеблется от $1,4 \cdot 10^{-7}$ до $2,8 \cdot 10^{-7}$ см³/см²·с, что всего лишь в 1,5...2,0 раза меньше, чем в стали без покрытия ($3,51 \cdot 10^{-7}$ см³/см²·с).

Водородопроницаемость стали с покрытиями уменьшается незначительно (максимум в 3,5 раза для хромовых покрытий). Такой результат, по-видимому, связан в первую очередь с малой толщиной изученных покрытий и их значительной дефектностью (поры, трещины). Подобные покрытия в определенной степени могут защищать сталь от наводороживания лишь на начальных стадиях.

Выводы. Ионно-плазменные Ni, Ti, Al, Cr, TiN покрытия малой толщины (0,5...4,0 мкм), полученные по представленным режимам, вследствие значительного количества дефектов (неравномерность, пористость, трещиноватость) не могут являться надежной защитой стали от наводороживания. Однако установленные в работе весьма низкие значения коэффициента диффузии водорода, в принципе, указывают на возможность использова-

ния этих покрытий при условии обработки технологических режимов их нанесения, исключающих образование дефектов. Причем лучшие результаты можно ожидать в случае нанесения хромовых и алюминиевых покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диффузионно-кооперативные покрытия и явления в системах металл — изотопы водорода. Сб. информационных материалов 1 Международного семинара "Металл — водород-92". Ч. I и II. Донецк, 1992. 2. Андрюшечкин В. И., Князев А. А., Поважан Ш. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1988. № 11. С. 101–103. 3. Кузнецов В. В., Николаев Э. М., Певнева А. В. — В кн.: Предупреждение наводороживания изделий в гальванических производствах. — Пермь: Изд. ПГУ. 1985. С. 20. 4. Арчаков Ю. И. Водородная коррозия стали. — М.: Металлургия, 1985. 5. Подгайский М. С. // ФХММ. 1967. Т. 3. № 3. С. 358–361. 6. Водород в металлах / Под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. Пер. с англ. Т. 2. Прикладные аспекты. — М.: Мир, 1981. — 426 с. 7. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. — М.: Металлургия, 1978. — 248 с.

Московский институт стали и сплавов. Поступила 17 ноября 1992 г.

УДК 621.746.58

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЧУГУННЫХ ЗАГОТОВОК НА РАЗЛИВОЧНЫХ МАШИНАХ

Р. Г. Акмен, А. М. Брагинский, Б. И. Кубрик

Эффективность работы разливочных машин для получения чугуновых заготовок определяется организацией процесса теплообмена по длине мультиметрического конвейера, что в свою очередь определяет динамику затвердевания и охлаждения чугуновой отливки. Существующие системы охлаждения чушек на мультиметрическом конвейере не позволяют получить среднюю температуру заготовки в конце конвейера ниже 650...700 °С по данным натурных испытаний на Кузнецком меткомбинате (КМК). Аналогичная картина наблюдается и на других предприятиях отрасли. Практически сложилась ситуация, когда мультиметрический конвейер разливочной машины используется только для формирования заготовки, а окончательное ее охлаждение производится либо в вагонах, куда грузятся чушки, либо в специальных ваннах, сооружаемых под конвейером разливочной машины. При этом расход воды на вторичное охлаждение достигает 13...15 м³/т чугуна с чрезвычайно низкой эффективностью. Кроме того, подобные мероприятия не исключают термического повреждения вагонов, куда грузятся отливки.

Таким образом, существует проблема обеспече-

ния охлаждения чугуновых отливок в пределах мультиметрического конвейера до температуры, исключающей повреждение вагонов и вторичное охлаждение, решение которой представляет существенный практический интерес для предприятий Минчермета. Для сравнительной оценки различных систем охлаждения чугуновых отливок на мультиметрическом конвейере необходимы данные по их эффективности. Учитывая высокотемпературный уровень процесса затвердевания металла, непрерывность процесса, сложность изготовления и монтажа различных систем охлаждения на действующем оборудовании, прямые экспериментальные исследования динамики затвердевания и охлаждения заготовок представляются нецелесообразными. Единственным приемлемым методом исследования влияния различных условий охлаждения отливки на динамику ее затвердевания и охлаждения является метод математического моделирования этого процесса, который позволяет также легко исследовать влияние формы и размера отливки на ее тепловое состояние.

Предварительные расчетные исследования показали, что градиент температуры по длине

отливки достаточно мал. Это практически исключает поток тепла по продольной координате и сводит задачу исследования теплового состояния заготовки и влияния на это состояние формы, размеров и условий охлаждения к двумерной постановке. В качестве объекта исследования принята центральная часть мульты с отливкой наибольшей толщины. Схема области, для которой строилась математическая модель и проводились расчетные исследования, представлена на рис. 1.

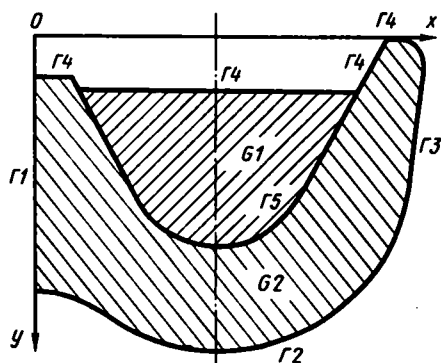


Рис. 1. Схема области решения задачи:

G_1 и G_2 — области заготовки и мульты; $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ — границы областей

Математическая модель исследуемого процесса затвердевания и охлаждения заготовки включает в себя записанное для областей G_1 (расплавленный металл) и G_2 (мульты) уравнение теплопроводности

$$c\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + q_V, \quad (1)$$

где c и ρ — теплоемкость и плотность металла; λ — коэффициент теплопроводности.

Для области G_2 в уравнении (1) имеем $q_V = 0$; для металла ($x, y \in G_1$) величина q_V представляет собой выделение теплоты фазового перехода в диапазоне температур ликвидус — солидус и определяется как

$$q_V = \begin{cases} 0 & \text{при } T > T_s \text{ и } T < T_L; \\ L\rho \frac{\partial \psi}{\partial \tau} & \text{при } T_s < T < T_L, \end{cases} \quad (2)$$

где L — истинная теплота плавления; ψ — доля твердой фазы в двухфазной области; T_s и T_L — температуры солидуса и ликвидуса.

Краевые условия для рассматриваемой модели включают начальные условия

$$\left. \begin{aligned} T_1(x, y, 0) &= T_0 \text{ при } x, y \in G_1; \\ T_2(x, y, 0) &= T_{01} \text{ при } x, y \in G_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где T_0 — начальная температура разливаемого металла; T_{01} — начальная равномерная температура мульты. Кроме того, к краевым относятся условия на границах областей G_1 и G_2 . На границе Γ_1 из-за геометрической и тепловой симметрии вводится адиабатная оболочка. Нижняя поверхность Γ_2 мульты охлаждается в условиях естественной конвекции. Из-за малых изменений температурного напора можно принять на этой границе условия третьего рода с постоянным коэффициентом теплообмена. Открытая поверхность Γ_4 чугуновой отливки в начальном периоде затвердевания охлаждается за счет излучения и свободной конвекции, а в дальнейшем находится под воздействием принудительного охлаждения с переменным во времени (по длине мультового конвейера) коэффициентом теплоотдачи. Поэтому на этой границе имеют место нелинейные граничные условия третьего рода с переменным во времени коэффициентом теплоотдачи. Аналогичные условия имеют место и на боковой поверхности мульты (граница Γ_3 на рис. 1) с отличием в значениях коэффициента теплоотдачи для начального участка конвейера. На границе Γ_5 контакта отливка — мульты с достаточной степенью точности можно принять граничные условия четвертого рода с идеальным тепловым контактом. Учет влияния известкового покрытия внутренней поверхности мульты может быть произведен с помощью эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эк}}$ со стороны мульты.

С учетом этих положений систему граничных условий можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x} &= 0 \text{ при } x, y \in \Gamma_1; \\ -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial n} &= \alpha(T_2 - T_c) \text{ при } x, y \in \Gamma_2; \\ -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \alpha_1(\tau)(T_2 - T_c) \text{ при } x, y \in \Gamma_4; \\ -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial n} &= \alpha_2(\tau)(T_2 - T_c) \text{ при } x, y \in \Gamma_3; \\ -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial n} &= \lambda_{\text{эк}} \frac{\partial T_2}{\partial n} \text{ при } x, y \in \Gamma_5; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

здесь α — коэффициент теплоотдачи; T_c — среднemasовая температура.

$T(x, y)$ от толщины заготовок практически не зависит. Как следует из данных, представленных на рис. 3, при существующей системе охлаждения минимальная температура заготовки на всем рассматриваемом участке ($\tau = 0...160$ с) имеет место на поверхности, контактирующей с мутью, где и происходит начальное формирование твердой корки чушки. Затвердевание заготовки на ее открытой поверхности начинается лишь через 30...40 с от момента заливки металла. В дальнейшем затвердевание заготовки у поверхности мутьды существенно замедляется, что связано с возрастанием термического сопротивления переносу тепла от жидкого расплава к мутьде, а также уменьшением градиентов температуры на границе раздела слиток — мутьда, и процесс формирования твердой фазы заготовки со стороны открытой поверхности становится преобладающим.

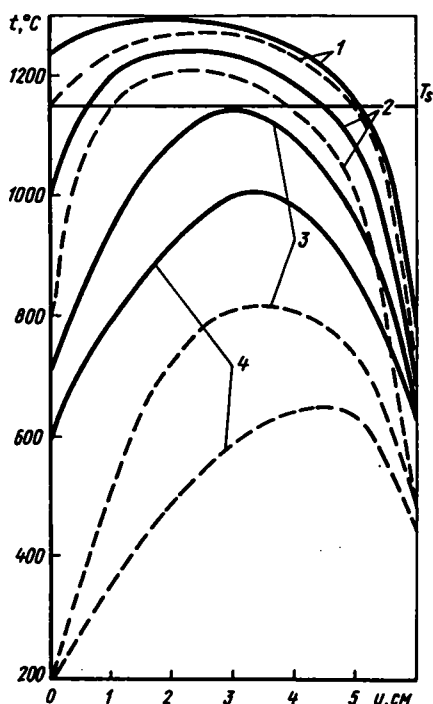


Рис. 3. Распределение температуры по сечению заготовки в зоне максимальной толщины при времени охлаждения: 20 (1), 40 (2), 120 (3) и 160 с (4):
 — существующий режим охлаждения; - - - - водовоздушное охлаждение

Исследовано влияние начальной температуры T_{01} мутьды на тепловое состояние и процесс затвердевания заготовки. Обсуждавшиеся выше результаты получены при $T_{01} = 90$ °C, что соответствовало экспериментально полученным значениям T_{01} в условиях реального производства. Численный эксперимент с моделью показал, что изменение T_{01} в диапазоне 60...120 °C практически не сказывается на значениях τ_3 и вызывает лишь на начальной стадии формирования заготовки

повышение \bar{T} на 20...25 °C. В конце мутьдового конвейера отличия в значениях \bar{T}_k для указанного диапазона изменения T_{01} не превышает 5...8 °C.

Таким образом, при существующей системе охлаждения температура открытой поверхности отливки, подвергаемой принудительному охлаждению, становится ниже температуры затвердевания $T_s = 1150$ °C лишь через 35...40 °C после начала охлаждения. Активный теплоотвод начинается через 50...60 с. Поэтому возникает необходимость в разработке иной системы охлаждения, позволяющей получить более низкие значения \bar{T}_k заготовок

в пределах мутьдового конвейера. Как следует из проведенных численных экспериментов, необходимо прежде всего интенсифицировать охлаждение открытой поверхности отливки, особенно в начальное (до 40...50 с) время охлаждения (рис. 3).

В качестве основы для интенсификации охлаждения может быть использовано водовоздушное охлаждение отливок, позволяющее обеспечить широкий диапазон плотности орошения (j) и мелкодисперсный состав капель в факеле распыленной воды. Оценочные расчеты и исследования на экспериментальных стендах показали, что применение "мягкого" водовоздушного охлаждения с $j = 0,4...0,6$ кг/(м²·с) на этом участке обеспечит коэффициенты α теплоотдачи порядка 400...500 Вт/(м²·K), что в 3...4 раза выше значений α , имеющих место при существующей системе охлаждения. На последующих участках конвейера значения j порядка 10...20 кг/(м²·с) сделают возможным достижения α порядка 3000...3500 Вт/(м²·K). Как показали эксперименты, среднее значение α составляет в этом случае 2500 Вт/(м²·K). Используя зависимости $\alpha = f(j, t_n)$, полученные ранее при исследовании

теплообмена в процессе охлаждения разогретой поверхности диспергированной водой вблизи кризиса кипения, проведены расчеты теплового состояния заготовок толщиной $\delta = 50...60$ мм в условиях измененной системы охлаждения.

Результаты расчетов приведены на рис. 2 и 3 в сопоставлении с ранее полученными данными. Распределение температуры $T(x, y)$ по сечению заготовки в условиях предлагаемой системы претерпевает некоторые изменения и указывает на более высокий темп снижения температуры на открытой поверхности заготовки, а также на то, что при достижении температурой t_n значения, близкого к критической температуре $t_{кр1}$, т. е.

переходу от пленочного режима кипения к пузырьковому, когда теплоотвод с поверхности заготовки достигает максимума, она резко снижается и

остается на постоянном уровне, соответствующем $t_{\text{кр}_1} \approx 200^\circ\text{C}$. В условиях водовоздушного охлаждения

величина \bar{T}_k в конце конвейера при $\delta = 50$ мм составляет порядка 310°C , а при $\delta = 60$ мм уровень \bar{T}_k достаточно высок — примерно 450°C .

Таким образом, применение системы водовоздушного охлаждения позволяет на $150\ldots 200^\circ\text{C}$ снизить среднемассовую температуру отливок в пределах конвейера разливочной машины. Однако для отливок толщиной 60 мм уровень температур все еще высок, что требует дополнительного охлаждения вне конвейера разливочной машины.

Для снижения температуры отливок с целью исключения дополнительного охлаждения вне конвейера разливочной машины целесообразно, во-первых, перейти на литье заготовок толщиной 50 мм, однако при этом для сохранения неизменной производительности машины следует увеличить скорость движения конвейера на 20 %, тогда среднемассовая температура отливок составит около 350°C , что на $40\ldots 45^\circ\text{C}$ выше, чем при скорости движения 9 м/мин; во-вторых, изменить конфигурацию мульты так, чтобы при неизменной массе отливок ее толщина не превышала $40\ldots 45$ мм и соответственно развитой поверхностью охлаждения. Расчеты показали, что в этом случае при неизменной скорости движения конвейера среднемассовая температура составит примерно 210°C .

Выводы. Разработана и реализована на ЭВМ математическая модель формирования чугунных заготовок на мультном конвейере, позволяющая прогнозировать тепловое состояние системы мульт — чушка в широком диапазоне изменения параметров разливки. Основным фактором, определяющим среднемассовую температуру заготовки в конце мультного конвейера и время ее полного затвердевания, является толщина заготовки. Существующая система водяного охлаждения не позволяет обеспечить для наиболее распространенного типоразмера заготовок уровень среднемассовой температуры, исключающий охлаждение вне разливочной машины. Необходимый уровень температур может быть достигнут лишь при переводе системы на водовоздушное охлаждение с одновременным переходом разливочного агрегата на литье заготовок толщиной порядка 50 мм (при этом для сохранения прежней производительности агрегата скорость движения конвейера должна быть увеличена примерно на 20 %), либо на литье заготовок с измененной конфигурацией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник / Под ред. Б. Е. Неймарк — М.: Энергия, 1967. — 240 с.
2. Братута Э. Г., Селихов Ю. А. // Изв. вуз. Машиностроение. 1988. № 12. С. 55–58.

Харьковский политехнический институт.

УДК 621.745.34

КОЭФФИЦИЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПЛОТНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛОВ ВАГРАНОЧНОЙ ПЛАВКИ

И. Ф. Селянин, Г. Л. Маркс, А. И. Куценко, С. А. Зубакин

Эксперименты проводили на вагранке с внутренним диаметром $D = 0,5$ м и полезной высотой $H = 3,185$ м. Развертка фурменного пояса с измерительными точками приведена в работе [1]. Печь оборудована контрольно-измерительными приборами для определения расхода воздуха по каждой фурме и статического давления по высоте шахты. Средний размер куска определяли по формуле $\bar{d} = (V_i / d_i)^{-1}$, где V_i и d_i — объемная доля и средний размер i -го куска материала.

Гистограммы представлены в развернутых формулах для определения среднего размера куска кокса (\bar{d}_k) и известняка ($\bar{d}_и$)

$$\bar{d}_k = \frac{0,20}{0,045} + \frac{0,48}{0,055} + \frac{0,10}{0,065} + \frac{0,07}{0,075} + \frac{0,15}{0,085} = 0,0575 \text{ м;}$$

$$\bar{d}_и = \frac{0,30}{0,04} + \frac{0,15}{0,06} + \frac{0,43}{0,08} + \frac{0,12}{0,10} = 0,06 \text{ м;}$$

здесь в числителе каждого слагаемого стоит объемная доля материала со средним диаметром, который представлен в знаменателе слагаемого.

Порозность ϵ слоя находили путем взвешива-